

Marcin WESOŁOWSKI*
Ryszard NIEDBAŁA*
Jacek HAUSER**

WYZNACZANIE DYFUZYJNOŚCI CIEPLNEJ PRZY WYKORZYSTANIU KAMERY TERMOWIZYJNEJ

Niniejsza praca dotyczy zagadnień wyznaczania dyfuzyjności cieplnej ciał stałych, przy wykorzystaniu technik termowizyjnych. Pomiary parametrów cieplnych charakteryzujących elementy termoizolacyjne są zazwyczaj długotrwałe, co ogranicza ich przydatność w zastosowaniach praktycznych. Pomiary takie nie mogą być wykonywane w warunkach produkcyjnych, do monitorowania jakości wszystkich produktów. W artykule zaprezentowano nową metodę eksperymentalno-obliczeniowego wyznaczania dyfuzyjności cieplnej. Metoda charakteryzuje się krótkim czasem pomiaru, wysoką dokładnością oraz niewielką wrażliwością na warunki zewnętrzne. Dzięki temu istnieje możliwość jej łatwej implementacji w aplikacjach o charakterze przemysłowym. W pracy przedstawiono koncepcję metody pomiarowej oraz modelu urządzenia badawczego, wykorzystującego zespół promienników podczerwieni i kamerę termowizyjną. Wykonane analizy oraz wstępne badania potwierdzają skuteczność i wysoką dokładność proponowanych rozwiązań.

SŁOWA KLUCZOWE: pomiar dyfuzyjności cieplnej, kamera termowizyjna

1. WPROWADZENIE

Przewodność cieplna właściwa oraz dyfuzyjność cieplna są podstawowymi parametrami charakteryzującymi ciała stałe pod względem zdolności przewodzenia energii cieplnej odpowiednio: w stanie cieplnie ustalonym oraz cieplnie nieustalonym. Istnieje wiele metod wyznaczania tych wielkości, zarówno w stanach statycznych, jak i dynamicznych [1, 2, 3]. Bardzo często, w przypadkach wymagających wysokiej dokładności, badania przewodności cieplnej właściwej oraz dyfuzyjności wymagają wykonywania długotrwałych pomiarów w warunkach laboratoryjnych [2]. Tego rodzaju pomiary nie mogą być wykonywane na szeroką skalę, na przykład w warunkach produkcyjnych. Istnieje zatem potrzeba opracowania i wykorzystywania procedur i urządzeń umożliwiających wyznaczanie przewodności cieplnych w sposób szybki, oraz gwarantujących

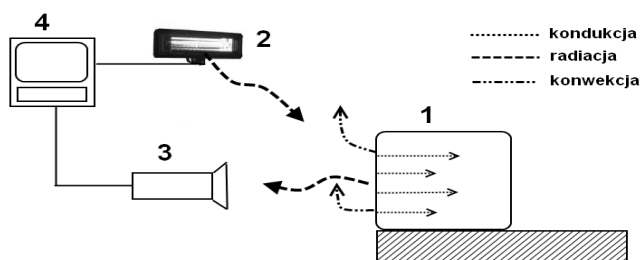
* Politechnika Warszawska.

** Politechnika Poznańska.

wysoką dokładność. Przykładem stosowalności tego rodzaju rozwiązań są procesy wytwórcze materiałów i przegród termoizolacyjnych (lodówki, szyby okienne, itp.), gdzie dodatkowo nie ma możliwości montażu czujników temperatury wewnątrz analizowanego obiektu. Niniejsza praca dotyczy zastosowania nowoczesnych technik pomiarowych w zagadnieniu wyznaczania dyfuzyjności cieplnej materiałów, bądź elementów, na podstawie dynamicznych zmian temperatury na powierzchni zewnętrznej badanych ciał stałych. Zaprezentowane obliczenia dotyczące propagacji ciepła w analizowanych elementach umożliwiło opracowanie przesłanek do metody pomiarowej. Wyszczególniono podstawowe źródła błędów oraz sposoby ich eliminacji bądź ograniczenia. Opracowane stanowisko pomiarowe wykorzystane zostało do wykonania wstępnych pomiarów umożliwiających ocenę dokładności i stosowalności proponowanej metody.

2. KONSTRUKCJA STANOWISKA POMIAROWEGO

Niestacjonarne metody pomiarowe dyfuzyjności cieplnej, polegają zazwyczaj na ocenie dynamicznych zmian temperatury wywoływanych przez kontrolowane źródło ciepła. Ogólny schemat stanowiska pomiarowego, zgodnego ze standardami przy tego rodzaju pomiarach, pokazany został na rysunku 1.



Rys. 1. Stanowisko do pomiaru dyfuzyjności cieplnej: 1- obiekt badany; 2- zespół promienników; 3- kamera termowizyjna; 4- komputer nadrzędny

Stanowisko składa się z zespołu promienników podczerwieni o konstrukcji umożliwiającej izotermiczne nagrzanie badanej powierzchni płaskiej. Stopień jednorodności pola temperatury jest wyznaczany na podstawie termogramów. Warto zaznaczyć, iż wysoka dokładność metody pomiarowej możliwa jest do osiągnięcia jedynie w przypadku jednokierunkowego przepływu ciepła, co wymaga jednorodnego napromieniowania badanej powierzchni. W takich warunkach możliwe jest stosowanie dowolnego sposobu pomiaru temperatury powierzchni, na przykład przy wykorzystaniu pirometru umożliwiającego dokonywanie bardzo szybkich pomiarów. W przypadku detekcji miejscowych wad materiałów termoizolacyjnych, kamery termowizyjne stanowią obecnie najlepsze rozwiązanie. Z tego względu, w proponowanej metodzie pomiarowej kamera

stanowi drugi element, istotnie wpływający na poszerzenie spektrum stosowalności i dokładność metody pomiarowej. Trzecim elementem stanowiska jest komputer nadrzędny z zaimplementowanym oprogramowaniem umożliwiającym szybkie wyliczanie poszukiwanej wartości dyfuzyjności cieplnej.

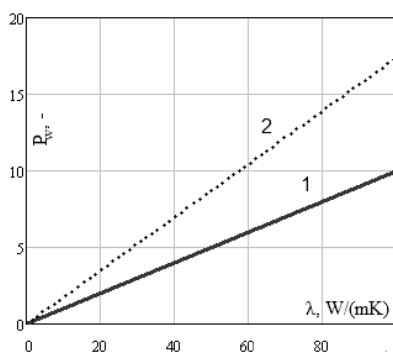
3. WYMIANA CIEPŁA NA POWIERZCHNIACH CIAŁ STAŁYCH

Zagadnienia związane z analizą stanu pól temperatury na zewnętrznych powierzchniach ciał stałych wymagają zazwyczaj rozpatrywania szeregu zjawisk związanych z dyfuzją ciepła do wnętrza, oraz wymianą ciepła pomiędzy rozpatrywaną powierzchnią a jej otoczeniami. Określanie dyfuzyjności cieplnej a (w m^2/s), równej:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (1)$$

gdzie: λ - przewodność cieplna właściwa (w $W/(m \cdot K)$); c_p - ciepło właściwe (w $J/(kg \cdot K)$); ρ - gęstość (w kg/m^3), wymaga dokładnej ilościowej analizy wspomnianych zjawisk.

Określenie zasad pomiaru dyfuzyjności cieplnej rozpoczęto od przeprowadzenia podstawowych obliczeń strumieni cieplnych wymienianych z powierzchni ciała stałego na drodze konwekcji, radiacji oraz kondukcji. Podstawowe zależności podane w [2, 3] wykorzystano do wyznaczania mocy cieplnych w stanie ustalonym. Założono izotermiczność ciała stałego oraz otoczenia. Jedynie analizowana powierzchnia charakteryzowała się temperaturą wyższą o 1 K, w stosunku do pozostałego obszaru układu. Na rysunku 2 pokazano przebieg wartości współczynnika p - będącego ilorzem wartości mocy cieplnej przewodzonej do wnętrza ciała stałego i sumie mocy cieplnych traconych przez konwekcję i radiację - w funkcji przewodności cieplnej właściwej λ , zmienianej w granicach 0 – 100 $W/(m \cdot K)$.



Rys. 2. Charakterystyki stosunku mocy cieplnych przewodzenia do sumy mocy cieplnych traconych przez konwekcję (1) i radiację (2) z powierzchni ciała stałego

Przy niskich wartościach przewodności cieplnych właściwych, wartości mocy cieplnych traconych do otoczenia są porównywalne z mocą przewodzoną do wnętrza ciała stałego. Precyzyjna znajomość strat cieplnych jest zatem niezmiernie istotna przy wyznaczaniu dyfuzyjności cieplnych materiałów termoizolacyjnych.

Opracowanie metody wyznaczania dyfuzyjności cieplnej poprzedzone zostało analizą zjawiska przewodzenia ciepła w ciałach stałych o zróżnicowanych parametrach materiałowych. Celem obliczeń było dokonanie oceny wpływu poszczególnych parametrów materiałowych oraz geometrycznych, na stan pola temperatury badanego ciała. Obliczenia i analizy wykonano w oparciu o równanie przewodzenia ciepła dla nie poruszających się ciał stałych (równanie Fouriera – Kirchoffa) o postaci [4]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{p_V}{c_p \rho} + \frac{\lambda}{c_p \rho} \nabla^2 t \quad (2)$$

gdzie: t - temperatura (w K), τ - czas (w s), p_V - gęstość objętościowa mocy cieplnej (w W/m^3).

Model matematyczny zagadnienia brzegowego wymiany ciepła zakładał, iż energia cieplna od promiennika podczerwieni wydzielana jest w przypowierzchniowej warstwie ciała stałego o grubości 1 nm. W pozostałym obszarze zależność (2) została uproszczona poprzez pominięcie gęstości objętościowej mocy p_V . Równania przewodzenia ciepła uzupełniono warunkami granicznymi. Jako warunek początkowy przyjęto jednorodną temperaturę całego układu termokinetycznego na poziomie $t_0 = 20^\circ C$. Temperatura ta była charakterystyczna dla otoczenia rozpatrywanego ciała i nie zmieniała się podczas całej analizy.

Na zewnętrznych powierzchniach analizowanego ciała założono warunek brzegowy trzeciego rodzaju o postaci:

$$\alpha(t_F - t_0) = \lambda \frac{dt}{dn} \quad (3)$$

gdzie: α - całkowity współczynnik przejmowania ciepła (w $W/(m^2 \cdot K)$); t_F - temperatura powierzchni; t_0 - temperatura otoczenia.

W celu uwzględnienia konwekcyjnej i radiacyjnej wymiany ciepła, całkowity współczynnik przejmowania ciepła, równy sumie konwekcyjnego i radiacyjnego współczynnika przejmowania ciepła, podano w postaci:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_r = \frac{[C(Gr Pr)^n] \cdot \lambda}{\delta_c} + \sigma_0 \varepsilon (T_F + T_0)(T_F^2 + T_0^2) \quad (4)$$

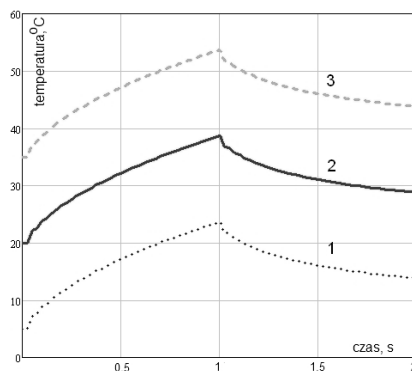
gdzie: Gr - liczba Grashofa; Pr - liczba Prandtla; ε - emisyjność.

Zaprezentowany model matematyczny stanowił kompletny opis analizowanego układu. Z uwagi na ogólny charakter prowadzonych analiz, przyjęto model jednowymiarowy, charakterystyczny dla jednostkowego przewodzenia ciepła w nieskończenie rozległym układzie płaskim. Obliczenia wykonano przy wykorzystaniu autorskiego algorytmu, zaimplementowanego w środowisku

MathCad. Wykonano szereg analiz, których podstawowym celem było opracowanie metody wyznaczania parametrów ciała stałego na podstawie zmian temperatury na jego powierzchni, oraz określenie dopuszczalnych granic stosowalności metody, przy których charakteryzować się ona będzie akceptowalną dokładnością. Podstawowe wymagania, co do metody pomiarowej sformułowano następująco:

- szybkość działania, gwarantująca możliwość implementacji w warunkach produkcyjnych;
- wysoka dokładność, umożliwiająca detekcję wadliwych konstrukcji powłok termoizolacyjnych;
- niewrażliwość na środowisko robocze, zwłaszcza na zmienne warunki temperaturowe otoczenia.

Z uwagi na powierzchniowy charakter pomiarów temperatury, wyodrębniono grupę czynników istotnie wpływających na proces dyfuzji. Zgodnie z założeniami proponowanej metody, pomiar dyfuzyjności cieplnej powinien odbywać się w warunkach o możliwie odmiennych wartościach temperatury otoczenia. Badane ciało w chwili początkowej będzie miało temperaturę równą temperaturze otoczenia, a jego powierzchnia poddawana będzie działaniu impulsu energii cieplnej. Wykonano obliczenia wpływu temperatury otoczenia na charakterystyki nagrzewania i chłodzenia analitycznego ciała stałego, przy temperaturze otoczenia zmienianej od 5°C, do 50 °C. Wybrane charakterystyki temperaturowe dla analizowanych przypadków pokazano na rysunku 3.



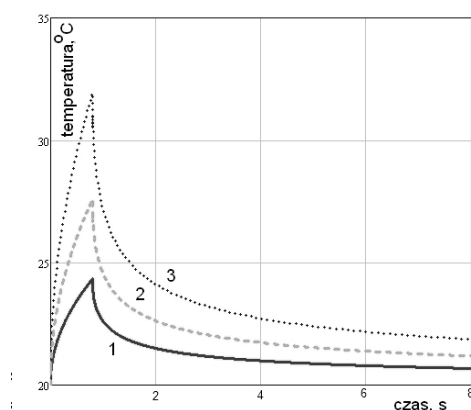
Rys. 3. Przebiegi temperatur powierzchni ciała stałego, dla zróżnicowanych temperatur otoczenia:
1. $t_0 = 5^\circ\text{C}$; 2. $t_0 = 20^\circ\text{C}$; 3. $t_0 = 35^\circ\text{C}$

Otrzymane wyniki są charakterystyczne dla modelu liniowego. Charakterystyki zmian temperatury w czasie są analogiczne i przesunięte względem siebie o wartość temperatur otoczenia. Wpływ temperatury otoczenia może być zatem korygowany, poprzez dwukrotny pomiar temperatury powierzchni próbki, w

ustalonych chwilach czasowych. Nieznajomość mocy cieplnej wydzielającej się na powierzchni badanego ciała oraz dokładnych warunków początkowych podczas pomiarów, może być przyczyną znacznych błędów wynikających z niepoprawnej korekcji warunków otoczenia. Dodatkowe analizy uwzględniające zmienny współczynnik przejmowania ciepła umożliwiły stwierdzenie znikomego wpływu tego parametru na wyliczane charakterystyki temperaturowo – czasowe.

W zagadnieniach praktycznych nagrzewania promiennikowego, trudno jest określić rzeczywistą wartość mocy padającą na nagrzewaną powierzchnię. Zależna jest ona od mocy promiennika (mogącej zmieniać się podczas nagrzewania), parametrów powierzchni ciała stałego, oraz współczynników konfiguracji układu grzejnego.

Opracowany model obliczeniowy wykorzystano do ustalenia wpływu mocy padającej na nagrzewaną powierzchnię na charakterystyki nagrzewania i chłodzenia powierzchni ciała stałego. Zakładano, iż moc wydzielana w przypowierzchniowej warstwie zmienia się w zakresie 2 – 5.5 kW. Założono niezmiennie parametry materiałowe ciała, oraz stałą wartość współczynnika przejmowania ciepła. Wyniki obliczeń zaprezentowano na rysunku 4.

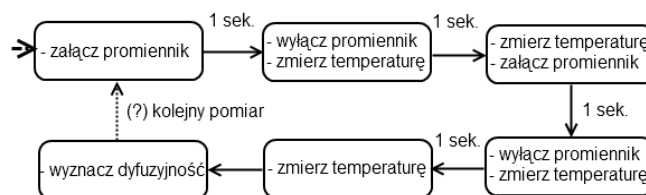


Rys. 4. Przebiegi temperatury powierzchni ciała stałego przy stosowaniu różnych mocy grzejnych.
1. $P = 2$ kW; 2. $P = 3.5$ kW; 3. $P = 5.5$ kW

Na podstawie obliczeń wykazano, iż nawet przy stosowaniu modelu liniowego, o niezmiennych parametrach i warunkach granicznych, charakterystyki nagrzewania i chłodzenia różnią, pod względem ilościowym, jak i jakościowym. Zarówno stałe czasowe chłodzenia, jak i wartości temperatur w kolejnych chwilach czasowych są odmienne. Nawet w skali bezwymiarowej nie udało się zunifikować i uogólnić otrzymanych wyników. Wpływ mocy powierzchniowego źródła ciepła (o nieznannej wartości) w połączeniu ze zmiennymi warunkami otoczenia, praktycznie uniemożliwia zastosowanie pojedynczego impulsu energii do powierzchniowego badania dyfuzyjności cieplnej ciał stałych.

4. METODA POMIARU DYFUZYJNOŚCI CIEPLNEJ

Wykonane obliczenia umożliwiły opracowanie nowej metody pomiaru dyfuzyjności cieplnej, wykorzystującej stanowisko o konstrukcji pokazanej na rysunku 1. Analiza źródeł błędów wykazanych podczas obliczeń była podstawą doboru odpowiedniej procedury, gwarantującej akceptowalną dokładność wyników uzyskiwanych podczas jej wykorzystywania. Algorytm pomiarowy pokazano na rysunku 5.

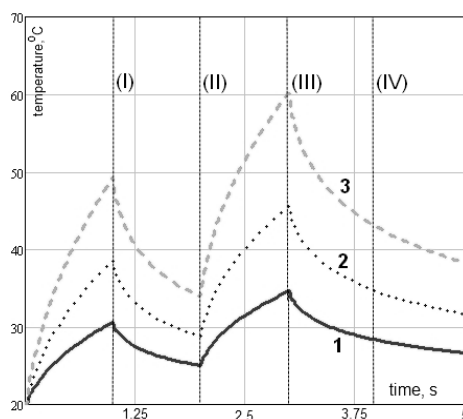


Rys. 5. Procedura pomiarowa dyfuzyjności cieplnej

Wykorzystanie dwóch serii pomiarowych umożliwiło eliminację błędów metod opierających się na pojedynczych impulsach, poprzez:

- uniezależnienie wpływu warunków zewnętrznych na współczynnik będący podstawą wyznaczania dyfuzyjności cieplnej;
- brak potrzeby znajomości mocy wydzielanej w analizowanym ciele;
- eliminację błędów metody pomiaru temperatury.

Badania poprawności przyjętych rozwiązań potwierdzono odpowiednimi obliczeniami. Powtórnej analizie poddano wpływ mocy cieplnej oraz warunków otoczenia. Przebiegi temperatur przy symulacji pracy układu w warunkach odmiennych mocy źródeł ciepła pokazano na rysunku 6.

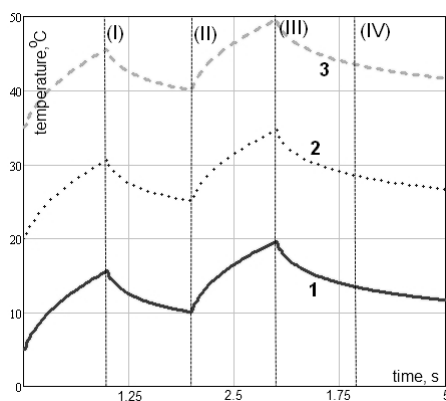


Rys. 6. Przebiegi temperatury na powierzchni ciała stałego, w odpowiedzi na dwa 1- sekundowe impulsy mocy, przy zróżnicowanych mocach źródła ciepła. 1. $P = 2 \text{ kW}$; 2. $P = 3.5 \text{ kW}$; 3. $P = 5.5 \text{ kW}$

Dla wszystkich zaprezentowanych przebiegów wyznaczono stosunek różnic temperatur w chwilach czasowych oznaczonych jako (I) i (II), oraz (III) i (IV), zgodnie z zależnością (5):

$$\Delta w = \frac{t_{(I)} - t_{(II)}}{t_{(III)} - t_{(IV)}} \quad (5)$$

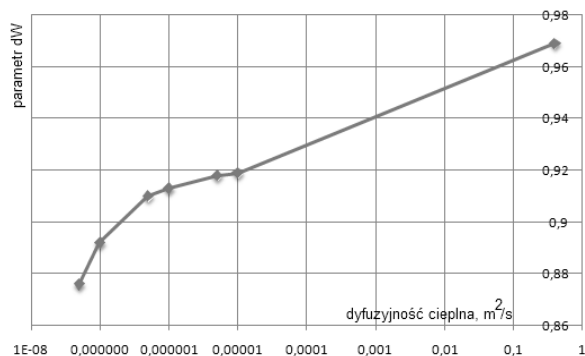
Wartość zmiennej Δw we wszystkich przypadkach była stała, i wynosiła 0.892. Wykazano zatem, iż w modelu liniowym, moc stosowanego źródła ciepła nie ma wpływu na względny stosunek spadków temperatury w odpowiedzi na dwa impulsy mocy grzewczej. Założenie to jest słuszne jedynie dla ciał charakteryzujących się stałymi parametrami materiałowymi i stałymi wartościami współczynników przejmowania ciepła. Podobne analizy wykonano podczas badania wpływu warunków cieplnych otoczenia, na charakterystyki temperatury wyznaczone w rozpatrywanym modelu. Wyniki obliczeń pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Przebiegi temperatury na powierzchni ciała stałego, w odpowiedzi na dwa 1- sekundowe impulsy mocy, przy zróżnicowanych temperaturach otoczenia. 1. $t_0 = 5^\circ\text{C}$; 2. $t_0 = 20^\circ\text{C}$; 3. $t_0 = 35^\circ\text{C}$

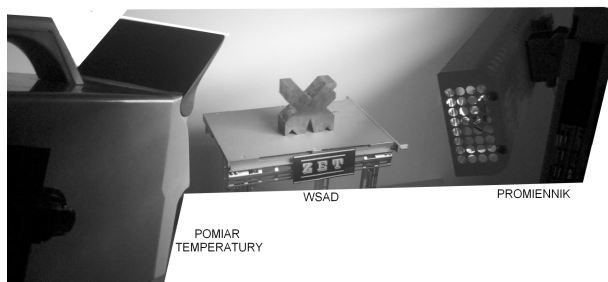
Również w tym przypadku wyznaczono zmienną Δw (5). We wszystkich przypadkach stosunek temperatur w wybranych chwilach czasowych wynosił 0.892, analogicznie do poprzednio rozpatrywanego przypadku. Uzyskane wyniki wykazały jednoznacznie brak wpływu czynników zewnętrznych oraz rodzaju i mocy źródeł ciepła, na wartość zmiennej określonej zależnością (5). Możliwe jest zatem jej zastosowanie w zagadnieniu pomiaru dyfuzyjności cieplnej. Wartość tej zmiennej jest bowiem zależna jedynie od jej wartości, po przyjęciu liniowości warunków granicznych i parametrów materiałowych. Fakt ten nie stanowi poważnego źródła błędów w proponowanej metodzie, z uwagi na niską różnicę temperatur pomiędzy badaną powierzchnią i otoczeniem.

Na podstawie wyliczeń współczynnika Δw (5) w funkcji dyfuzyjności cieplnej, otrzymano zbiór wartości pokazany w skali półlogarytmicznej na rysunku 8.



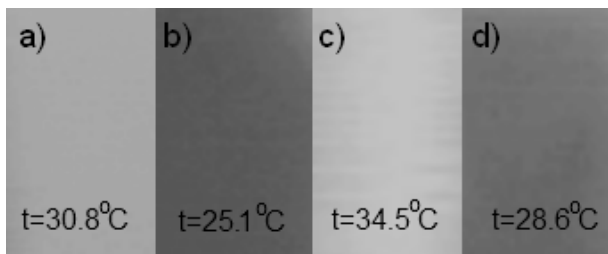
Rys. 8. Wartości współczynnika Δw w funkcji dyfuzyjności cieplnej

Na podstawie wyników, dobrano dwie funkcje interpolujące wyniki, dla niskich (materiały termoizolacyjne) i wysokich (przewodniki ciepła) wartości dyfuzyjności cieplnych. Metoda pomiarowa wykorzystana została do konstrukcji stanowiska pomiarowego, widocznego na rysunku 9.



Rys. 9. Stanowisko pomiarowe podczas pracy

Przykładowe wyniki badania termograficznego wycinka płaskiej powierzchni aluminiowej pokazano na rysunku 10, dla charakterystycznych (5) chwil czasowych.



Rys. 10. Termogramy wykonane dla powierzchni aluminium po czasie: a) 1 s; b) 2 s; c) 3 s; d) 4 s

Wartość współczynnika Δw dla analizowanego przypadku wynosiła 0.966. Dla tej wartości, wyznaczona dyfuzyjność cieplna wynosiła $0.387 \text{ m}^2/\text{s}$. Porównując tę wartość z danymi katalogowymi ($0,392 \text{ m}^2/\text{s}$), otrzymano błąd względny na poziomie 1.27 %. Jest to wartość niewielka, potwierdzająca przydatność opracowanej metody pomiarowej.

5. PODSUMOWANIE

W pracy zaproponowano prostą metodę wyznaczania dyfuzyjności cieplnej na podstawie pomiarów temperatury powierzchni próbki. Krótki czas wykonywania pomiarów umożliwia jej implementację w warunkach produkcyjnych. Wykonane obliczenia analityczne i numeryczne uwiaryściły szereg czynników mogących negatywnie wpływać na dokładność metod tej klasy. Dzięki wykonanym obliczeniom, opracowano algorytm pomiarowy niewrażliwy na warunki środowiskowe, wartość mocy cieplnej oraz błędy urządzenia pomiarowego temperatury. Podczas badań wykazana została prawidłowość funkcjonowania algorytmu pomiarowego oraz jego wystarczająca dokładność. Pewnym mankamentem jest znaczna wrażliwość metody na odchyłki mierzonych temperatur. Fakt ten jest wynikiem silnego wpływu temperatur mierzonych, na wartość dyfuzyjności.

LITERATURA

- [1] Minialaga V., Paulaukas R.: Heat Dissipation Investigation by Thermivision, Medical Physics in the Baltic States, Kaunas, 2010.
- [2] Chudzik S.: Thermal Diffusivity measurement of Insulating Material Using Infrared Thermography, Opto-Electronics Review, nr 1/2012.
- [3] Laskar J. M., Bagavathiappan S., Sardar M., Jayakumar T., Philip J., Raj B.: Measurement of Thermal Diffusivity of Solids Using Infrared Thermography, Materials Letters, no 62/2008.
- [4] Dane ze strony matweb.com (01.06.0213).
- [5] Hauser J.: Elektrotechnika. Podstawy Elektrotermii i Techniki Świetlnej. WPP 2006.

THERMOVISION MEASUREMENTS OF THERMAL DIFFUSIVITY

The article deals with thermal diffusivity measurements by using of thermovision techniques. Methods for determination of thermal parameters of insulating bodies are time consuming and so that, their utility in industry is inconsiderable. For example such measurements can't be used for online inspection of product quality. In the article, new method for determination of thermal diffusivity was presented. Basic concept and model of measuring device were discussed. The method is characterized by short measuring time, high accuracy and low dependence on external conditions. Exemplary measuring results were presented and all advantages of proposed method were proved.